

润扬大桥北汊斜拉桥索塔节段足尺模型试验研究

刘 钊 孟少平 刘 智 吉 林 欧庆保 王 强

(东南大学)

(江苏省长江公路大桥指挥部)

摘要: 通过润扬大桥北汊斜拉桥索塔锚固区的节段足尺模型试验, 研究了塔身 U 形束的预应力施工工艺, 进行了索塔模型在 U 形预应力束及斜拉索作用下的应力量测与分析, 给出了索塔的开裂及破坏荷载。对足尺模型进行斜向加载模拟斜拉索作用、借助于辅助模型研究孔道摩阻、全方位布置传感器测点等做法构成本次试验研究的特色。

关键词: 斜拉桥; 索塔; 足尺模型试验

中图分类号: U448.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2004) 06-0035-07

FULL-SCALE MODEL TEST FOR PYLON SEGMENT OF THE CABLE-STAYED BRIDGE OF RUNYANG YANGTZE RIVER BRIDGE

Liu Zhao Men Shaoping Liu Zhi

(Southeast University)

Ji Lin Ou Qingbao Wang Qiang

(Jiangsu Yangtze River Bridge Const. Commanding Dept.)

Abstract: By full-scale model test of the anchorage zone of the pylon of Runyang Yangtze River Bridge, the prestressing technique for the U-shaped tendons was investigated, and the stress distribution in the model were measured and analyzed, and the critical cracking load and ultimate load for the anchorage zone were obtained. The model test was characterized in the aspect of emulating the cable-action by diagonal loading facility, measuring the sheath friction by an auxiliary model, and distributing the stress sensors throughout the model.

Key word: cable-stayed bridge; bridge pylon, full-scale model test

1 概 述

润扬长江公路大桥是我国第一座由斜拉桥和悬索桥连贯组合的超大规模桥梁, 其北汊桥为双塔双索面钢箱梁斜拉结构, 主跨为 $176 + 406 + 176\text{m}$, 钻石形桥塔高 154m (图 1)。索塔采用预应力混凝土箱型断面。斜拉索通过锚块锚固于上塔柱的内壁, 为抵抗斜拉索的水平分力, 在锚固区的塔壁内设置了相互扣合的 U 形预应力束 (开口于索塔截面的长边), 成孔材料为 VSL 公司的 PT-PLUS 塑料波纹管。

试验研究目的主要有: U 形预应力束的张拉工艺及孔道摩阻系数, 拉索锚固区在塔身预应力束及斜拉索作用下的空间应力分析, 索塔控制截面的应力分布与设计计算方法, 开裂荷载及其控制因素, 开裂及破坏安全系数等。

在研究方法上, 对足尺模型进行斜向加载来模拟斜拉索作用、借助于辅助模型研究孔道摩阻、全方位布置传感器测点等做法在国内尚属首次。



图 1 润扬大桥北汊斜拉桥

Fig. 1 View of Runyang cable-stayed bridge over north branch

2 试验模型与测点布置

根据研究内容与目的, 设计了三个模型^[1]: 一是节段足尺试验模型, 二是 U 形预应力束孔道摩阻辅助试验模型, 三是预应力扩散角辅助试验模型 (限于篇幅, 本文不作介绍)。

2.1 节段足尺试验模型

节段足尺试验模型截取北索塔上塔柱高程自

收稿日期: 2002-08-04, 收到修改稿日期: 2002-10-15

136.850~139.350 (黄海高程) 的一段; 外形平面尺寸为 7m × 4m, 高 2.5m, 长边壁厚 0.8m, 短边壁厚 1.2m; 模型节段内设 4 束 (即 4 层) 开口于索塔截面长边的 U 形预应力索, 每束由 19 ϕ 15.24 钢绞线群锚体系组成, 其 U 形弯曲处的曲率半径为 1.6m。模型塔身所有构造尺寸与配置均与实际索塔相同, 施工工艺也与以后实际施工相同。为实现斜拉索的斜向加载, 在模型底部设预应力混凝土 T 形截面伸臂反力梁。模型斜向加载情况如图 2 所示。

模型中设置了内埋式钢弦应变传感器 59 个, 表面式钢弦应变传感器 35 个, 见图 3。同时还在模型表面设置了一定数量的千分表, 以便和表面式钢弦应变传感器互相校验。

2.2 孔道摩阻辅助试验模型

孔道摩阻辅助模型的平面尺寸取索塔截面尺寸的一半, 这样将塔身内的 U 形束剖分成半 U 形, 通过在塔壁处主动张拉半 U 形预应力束, 同时测得另一端的被动反力, 可以较准确地推算全 U 形束两端同

时张拉状态的孔道摩阻系数。模型设计见图 4。

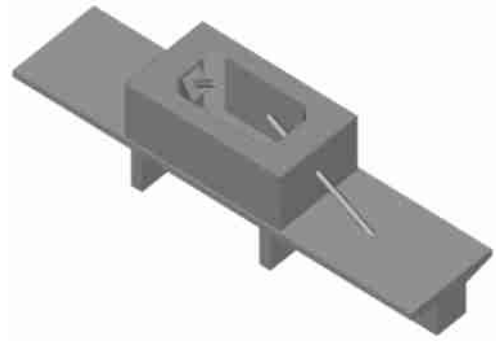


图 2 索塔节段模型斜向加载示意图

Fig. 2 View of diagonal loading of segmental model of the pylon

3 试验方法概要

3.1 节段足尺模型试验

加载试验考虑多种因素后, 决定分斜向加载和水

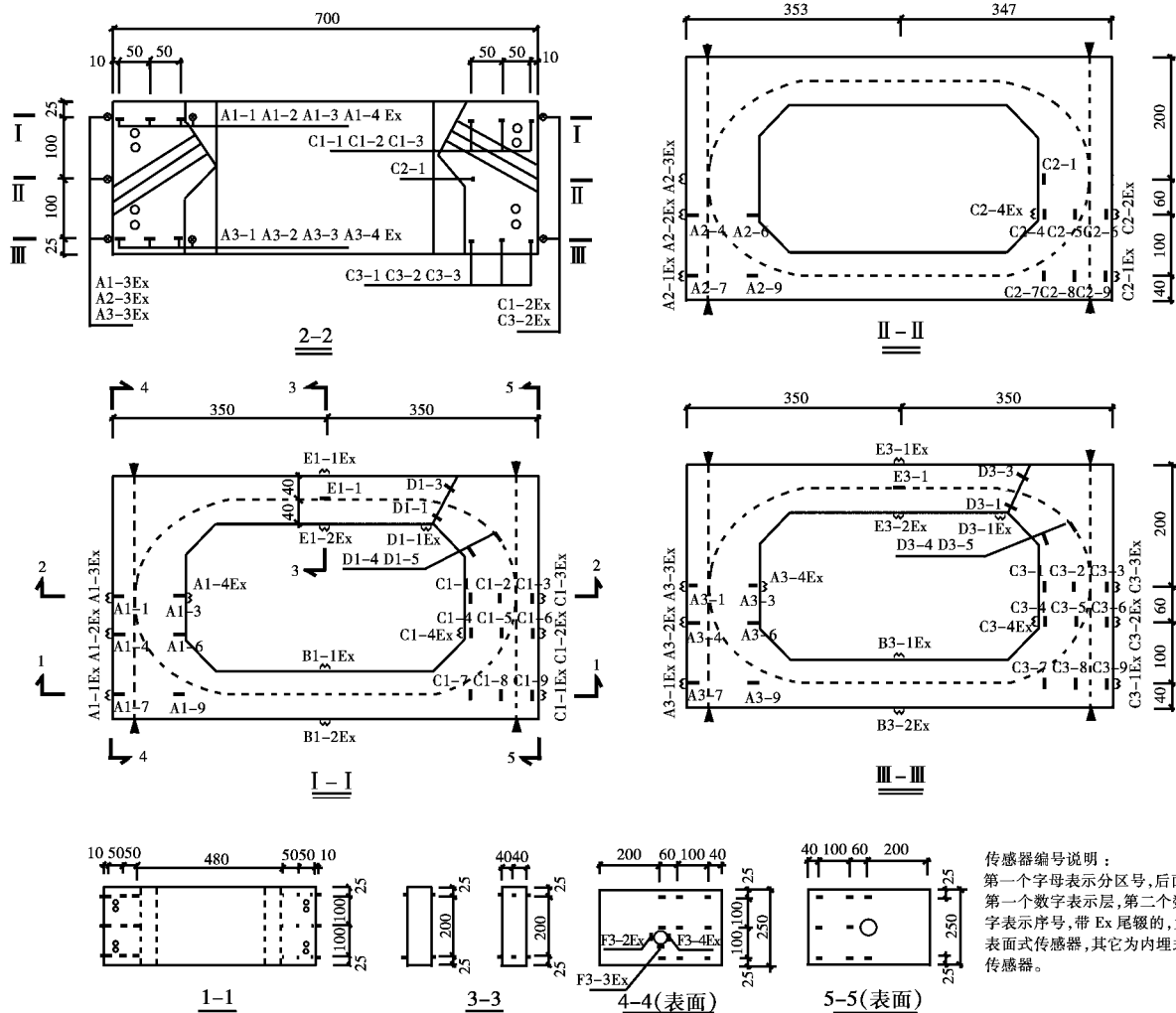


图 3 索塔节段足尺模型测点布置简图 (尺寸单位: cm)

Fig. 3 Sensors arrangement in the segmental model of pylon (Unit: cm)

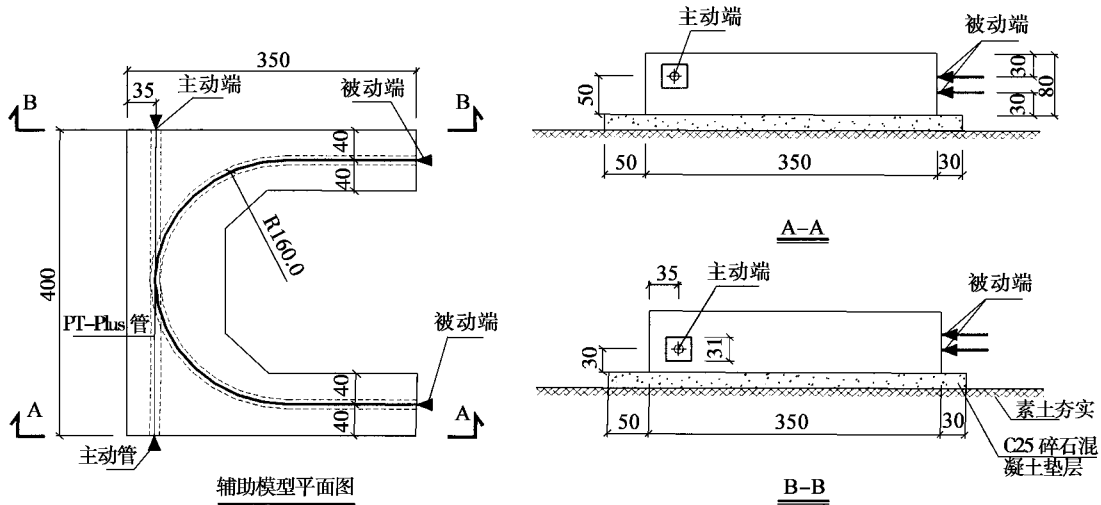


图 4 U 形孔道摩阻辅助试验模型 (尺寸单位: cm)

Fig. 4 Auxiliary model for U - shape sheath friction test (Unit: cm)

平加载两种方式进行。斜向加载的设计吨位为 9000kN；水平加载的最大吨位为 20000kN，以模型达到破坏为度。

斜向加载模拟索塔实际受力情况进行，选用 2 台 1000t 的千斤顶。预载分 5 级，每级增加 1000kN，最大加载至 5000kN，各级持荷 20min；分 2 次卸载至零。正式加载分 13 级，最大加载至 9000kN；卸载分 2 级。在每级荷载下，读取传感器的量测值。

在水平向加载试验前，对斜拉索锚固区进行处理，制作水平加载柱。水平加载试验分两次进行，第一次水平加载的最大吨位为 8000kN，然后卸载到零，目的在于找出模型长边内侧出现的第一条裂缝。第二次为破坏加载试验，最大加载吨位到 20000kN，从中找出模型短边的第一条裂缝，同时观察模型的弹塑性工作状态及最后的破坏形态。

3.2 孔道摩阻辅助模型试验

为推定 U 形孔道两端张拉时的孔道摩阻系数，对辅助模型的 2 个半 U 形孔道分别进行测试。主动端设在索塔的侧面，被动端设在剖分断面，以 19 根钢绞线为一束，与实际情况一致，张拉时只装锚板，不装夹片。最大张拉力取钢绞线标准强度的 0.75，分多级张拉，读取每级主动、被动端油压表值，同时记录钢绞线的伸长量，每一孔道重复测试 2 次。此外，在索塔节段足尺模型上，还对全 U 形孔道一端张拉时的摩阻系数进行测定，其方法与上述半 U 形孔道相同。

4 U 形预应力束施工工艺研究

4.1 孔道材料的选择、定位与预应力穿束

与目前常用的镀锌金属波纹管相比，塑料波纹管

(PT-PLUS) 由于具有自身刚度大、防腐性能好以及摩擦系数小等优点，因而适合于用作小曲率半径的 U 形预应力孔道材料。

每个 U 形预应力孔道内要穿入 19 ϕ 15.24 钢绞线束，穿束时机和穿束方法直接影响到工效。通过本次模型穿束结合南京二桥穿束试验^[2]，认为穿束时机应选择在混凝土浇筑以后比较好，理由有三：一是张拉端部模板易于封闭严密，不漏浆；二是穿束时间可以与上塔柱施工同步，节省工期；三是避免因钢绞线早穿入孔道，暴露时间过长而锈蚀。穿束方法以单根穿入法比较实用，先对各根钢绞线进行编号，在单根钢绞线头部套上刚性子弹头，用人工逐根穿束。若采用整束穿入法，则牵引力较大，需借助于卷扬机进行。

4.2 U 形预应力束孔道摩阻系数的测定

在桥梁规范中，孔道摩擦系数只与成孔材料有关，事实上，影响孔道摩擦的因素还有钢绞线的数量、张拉力的吨位以及孔道曲率半径等。为准确量测 U 形束在两端同步张拉时的摩阻系数，特别设计了测试孔道摩阻系数的辅助模型（图 4）。记主动端的锚下张拉力值为 P_1 ，被动端的张拉力值为 P_2 ，根据公路桥涵设计规范，可推算弯曲段的孔道摩阻系数：

$$\mu = -[\ln(P_2/P_1) + kx]/ \quad (1)$$

式中各量意义见桥规。据此，对于两端同步张拉的 U 形预应力束的孔道摩阻系数，可取按半 U 形塑料波纹管测得的摩阻系数实测平均值，即 $\mu = 0.16$ 。

4.3 U 形预应力束张拉伸长值的控制

在 U 形预应力束的张拉作业中，与张拉千斤顶油缸伸长量相校准的钢绞线理论伸长量，可按下式计算：

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2)$$

其中: L_1 为预应力束中有效应力引起的弹性伸长量, 可根据公路桥涵施工技术规范 (JTJ041 - 2000) 进行计算; L_2 为预应力束向曲线孔道内边贴紧或压入边壁所引起的几何伸长量; L_3 为工作锚到工具锚之间的钢绞线弹性伸长。

表 1 半 U 形塑料波纹管孔道实测摩擦系数
及摩擦损失率 (k 值取 0.001)

Table 1 Measured friction coefficients and friction loss rates
on the half-U plastic sheath ($k = 0.001$)

	实测 μ 值		固定端孔道摩擦损失率 (%)	
	1# 孔道	2# 孔道	1# 孔道	2# 孔道
正方向	0.166	0.155	23.5 %	22.18 %
反方向	0.180	0.148	25.2 %	21.4 %
平均值	0.173	0.152	24.35 %	21.79 %

为实现张拉作业的“张拉力为主, 伸长量校核”方针, 有必要规定一个初始张拉力, 从这个初读数开始量测以后的伸长, 作为与理论伸长量比较的依据。实测研究表明初始张拉应力以取 $0.25 \sigma_{con}$ 附近为宜。同时, 预应力束向曲线孔道内边挤压所引起的几何伸长量可据式 $L_2 = s/2$ 进行计算, 这里 s 为预应力束弧形向边壁的压入量。

5 索塔节段足尺模型试验研究

应用大型结构分析软件 ANSYS 对索塔模型进行了三维有限元仿真计算, 分析模型见图 5, 其中 U 形预应力束的有效作用力, 混凝土的弹性模量等均按实测取值。以下探讨索塔模型在斜向与水平加载下的分析计算及试验测试结果。

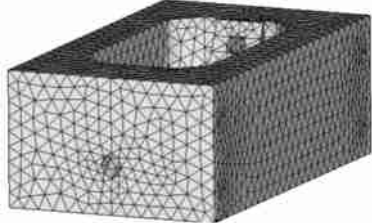


图 5 索塔有限元计算模型

Fig. 5 Pylon's FEM model of stayed tower

5.1 U 形预应力束的作用

短边应力分布 长边开口的 U 形预应力筋布置对短边的作用较强。江侧短边有 7 ~ 8.3MPa 的预压应力, 斜拉索孔上方局部达 9.3MPa。岸侧短边有 6.6 ~ 8MPa 的预压应力。斜拉索孔上方局部达 9MPa。

长边应力分布 长边内侧应力比较均匀, 最大预压应力在拐角处上部, 约 4MPa。长边角部外侧出现 0.4MPa 左右的拉应力, 局部达到 1MPa。

5.2 斜拉索锚固区局部应力分析

在 4000kN 斜向荷载下, 两侧锚块区域均出现了横向水平裂缝, 且一出现即有较大宽度。计算模拟实际加载情况, 加载面为外直径 70cm、内直径 50cm 的垫圈。计算表明, 在锚垫板周边上部主拉应力较大, 达到 3.5MPa 以上, 下部及两边较小, 不到 3MPa。由于锚块上部构造伸入索塔内壁, 配筋较多较密, 而下部及两边有临空面, 缺少侧向约束, 因此, 导致下部首先开裂。

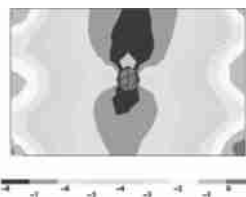


图 6 短边水平向预压应力

Fig. 6 Horizontal stress on shorter side due to prestressing

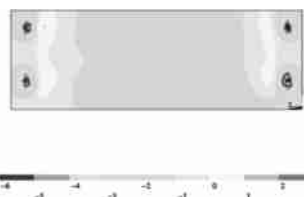


图 7 长边外侧水平向预压应力

Fig. 7 Horizontal stress on outboard longer side due to prestressing

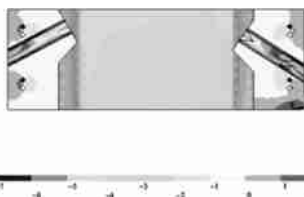


图 8 长边内侧水平向预压应力

Fig. 8 Horizontal stress on inboard longer side due to prestressing

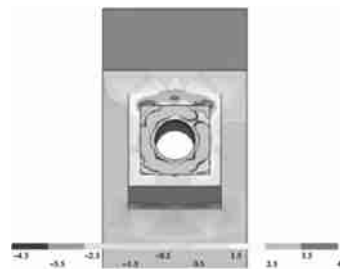


图 9 4000kN 斜向荷载下锚固区主拉应力图

Fig. 9 Principal tensile stress in anchorage zone
under 4000kN diagonal loading

5.3 斜向加载下索塔力学性能

(1) 工作索力下的力学分析

本桥在正常使用极限状态下斜拉索的最大索力为 $P = 5129\text{kN}$ (恒载 + 活载标准值), 在此索力下, 主

体结构呈弹性工作状态。长边中截面及短边中截面均未退压。长边内拐角上部刚刚退压, 在长边角部外侧附近出现 1.6MPa 左右的拉应力。



图 10 锚块下方试验加载开裂情况

Fig. 10 Cracked pattern under anchorage block during loading

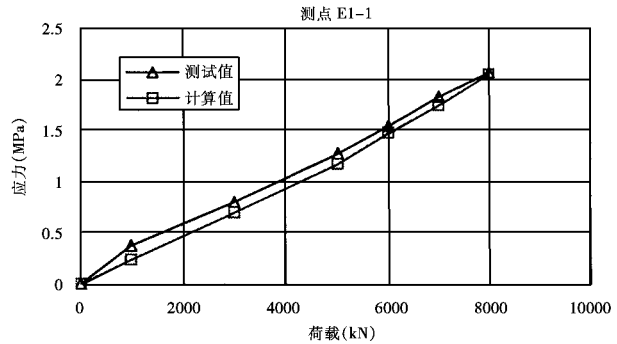
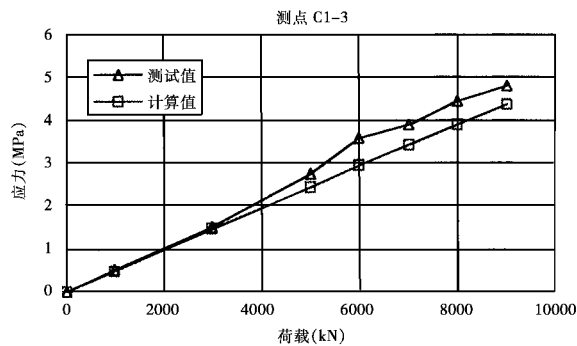


图 11 斜向加载下部分测点的荷载 - 应力曲线

Fig. 11 Load-stress curves of some measured points during diagonal loading test

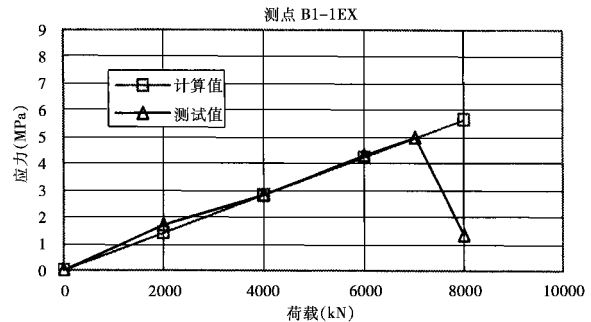
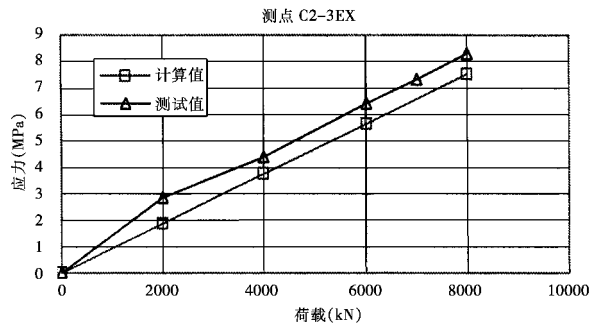


图 12 第一次水平加载试验时部分测点荷载 - 应力曲线

Fig. 12 Load-stress curves of some measured points during the first horizontal loading test

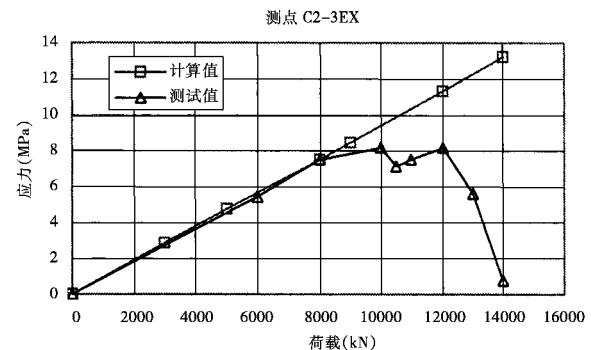
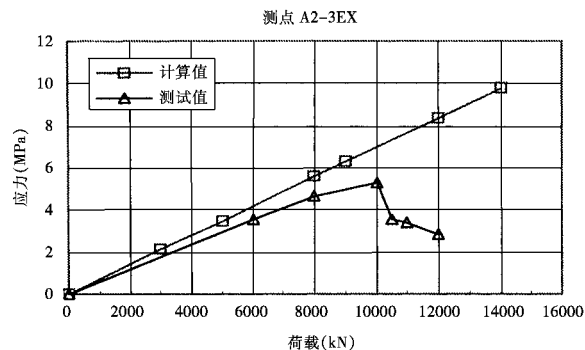


图 13 第二次水平加载试验时部分测点荷载 - 应力曲线

Fig. 13 Load-stress curves of some measured points during the second horizontal loading test

(2) 斜向加载下的荷载 - 应力曲线

这里给出部分测试点的荷载 - 应力曲线, 测点位置参见图 3。

(3) 斜向加载下的开裂荷载

如以 3MPa 拉应力作为开裂临界应力, 短边斜向开裂荷载为 $P_{1,cr} = 13100\text{kN}$; 长边斜向开裂荷载为 $P_{2,cr} = 9600\text{kN}$; 短边斜向抗裂安全系数 $P_{1,cr}/P = 2.55$; 长边斜向抗裂安全系数 $P_{2,cr}/P = 1.87$; 斜向加载时, 短边与长边开裂荷载之比为 $P_{1,cr}/P_{2,cr} = 1.36$ 。

5.4 水平加载试验索塔力学性能

(1) 水平加载下的荷载 - 应力曲线 (测点位置参见图 3), 见图 12 和图 13。



(a) 模型短边立面



(b) 模型长边立面

图 14 水平荷载达到 20000kN 后, 模型裂缝开展情况

Fig. 14 Cracked pattern of model as horizontal loading up to 20000kN

(2) 水平加载抗裂安全系数

试验研究及理论分析表明, 短边水平开裂荷载为 $P_{1,cr} = 10500\text{kN}$; 长边水平开裂荷载为 $P_{2,cr} = 7600\text{kN}$; 短边水平抗裂安全系数 $P_{1,cr} / (P \cos \alpha) = 2.33$; 长边水平抗裂安全系数 $P_{2,cr} / (P \cos \alpha) = 1.69$; 水平加载时, 短边与长边开裂荷载之比为 $P_{1,cr} / P_{2,cr} = 1.38$ 。

(3) 水平加载破坏安全系数

在水平荷载达到 20000kN 时, 长边角部外侧上部裂缝宽度已达 3cm, 裂缝处普通钢筋早已屈服, 由于荷载偏心, 钢筋不可能同时达到屈服, 因此可认为此时模型已达破坏状态 (长边预应力筋总的破断承载力为 23400kN)。按承载能力极限状态组合的最大索力的水平分力为 5603kN, 故模型的破坏安全系数为: $P_{u,cr} / P = 20000 / 5602 = 3.57$ 。

6 结论与建议

6.1 U形预应力束张拉工艺

采用塑料波纹管的小半径 U 形预应力束, 其孔道摩擦系数可取 $\mu = 0.16$ 左右。U 形预应力束张拉双控的初始应力建议取 $(0.25 \sim 0.3) \sigma_{con}$ 。理论伸长量应考虑预应力束向 U 形孔道边壁的贴紧或压入影响。

6.2 斜拉索锚固区局部应力与锚下构造

从试验及计算分析结果来看, 当斜拉索的拉力达到 4000kN 时, 锚固区表面主拉应力最大值达 3.5 ~ 4.5MPa, 锚块边缘有出现裂缝的可能性。建议将突出于塔壁内侧的楔形锚固区用钢板封包加强, 这可以给强大压应力下的锚固区混凝土提供侧向约束, 解决锚下抗裂问题。

6.3 斜向与水平加载下的抗裂安全系数

根据试验以及三维有限元分析计算结果, 斜向加载下, 长边抗裂安全系数 $P_{2,cr} / P = 1.87$; 短边抗裂安全系数 $P_{1,cr} / P = 2.55$ 。水平荷载下, 长边抗裂安全系数 $P_{2,cr} / P = 1.69$; 短边抗裂安全系数 $P_{1,cr} / P = 2.33$ 。进一步分析表明, 斜向加载比水平加载的结果更能反映索塔的真实受力状况。

6.4 索塔模型破坏安全系数

以水平荷载达到 20000kN 为索塔模型的破坏状态, 则破坏安全系数为: $P_{u,cr} / P = 20000 / 5602 = 3.57$ 。

6.5 关于塔身 U形预应力束的布置

本桥采用开口于长边的 U 形预应力布置, 这种布束方式预应力筋用量较省。但从试验及计算结果来看, 长边要先于短边开裂, 改善索塔环形预应力布置是解决长短边抗裂安全系数不均衡的有效途径, 建议对水平分力比较大的上塔柱上部, 沿长边方向增设直线预应力束, 预应力筋的位置可以在长边中央或略偏向长边内侧。

限于篇幅, 本文介绍的仅是润扬大桥北汊斜拉桥索塔模型试验的部分研究成果^[1]。

致 谢

本研究工作受到东南大学吕志涛院士、北京建达道桥咨询公司杨高中高工的指导, 同时还得到了江苏省长江公路大桥建设指挥部, 东南大学预应力工程研究所, 北京建达道桥咨询公司, 大桥工程建设监理公司以及中港第二航务工程局的许多支持, 在此鸣谢!

参 考 文 献

- [1] 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 东南大学华东预应力技术联合开发中心等. 润扬长江公路大桥北汊斜拉桥索塔锚固区足尺模型试验研究报告, 2002 年 8 月, 南京
- [2] 东南大学预应力工程研究所研究报告: 大曲率 U 形预应力束及真空辅助压浆技术在南京长江二桥索塔工程中的应用研究, 1999 年 12 月, 南京

(下转第 51 页)

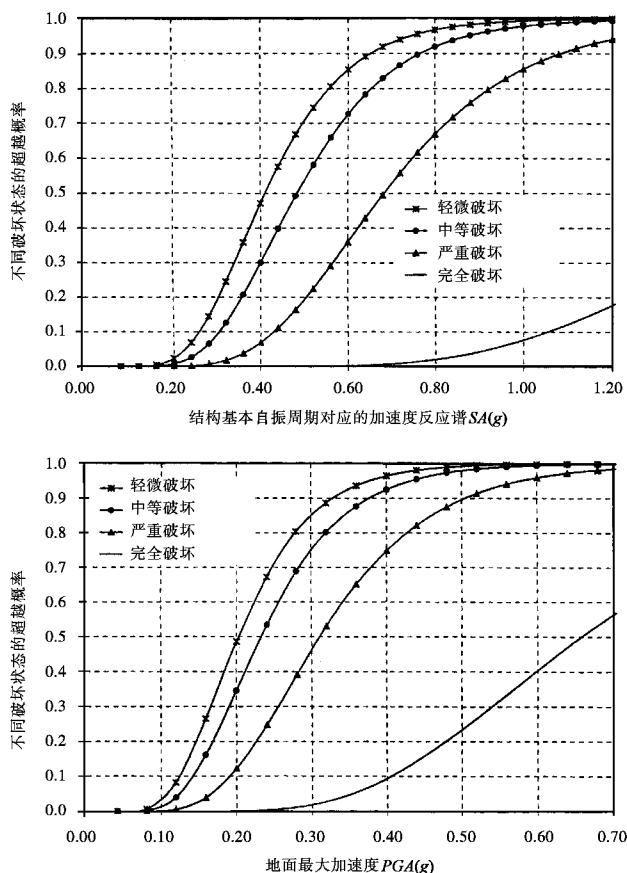


图 3 钢筋混凝土桥的地震易损性曲线

Fig. 3 Seismic fragility curve of reinforced concrete bridge

自振周期用于确定 SA 有时会遇到困难。 SA 不是一个纯的地震动参数, 为了找到一个合适的纯地震动参数来表达结构反应和易损性曲线, 需要开展进一步的研究。

H. Hwang 美国孟菲斯大学教授, 主要从事地震危险性分析, 结构抗震可靠度, 生命线工程, 城市地震灾害预测, 土动力学方面的研究工作。

刘晶波 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程, 地震工程和防灾减灾工程方面的研究和教学工作。通讯地址: 100084 北京市清华大学土木工程系

参 考 文 献

- [1] Hwang, H., Jernigan, J. B. and Lin, Y. W. 1999. Expected seismic damage to Memphis highway systems. In Proceeding of the 5th US. Conference on Lifeline Earthquake Engineering. Seattle, WA, 12 - 14 August, 1999: 1 ~ 10
- [2] Hwang H., Liu J. B. and Chiu Y. H. 2000. Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges. Technical report, Center for Earthquake Research and Information, University of Memphis, Memphis, TN
- [3] Boore, D. M. 1996. MIM-Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 1.0 Open File Report 96 - 80 - A. Menlo Park, CA: U. S. Geological Survey
- [4] Idriss I. M. and Sun J. I. 1992. SHAKE91, a Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally layered Soil Deposits: User's Manual. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA
- [5] Hwang, H. and Huo, J. R. 1994. Generation of hazard-consistent ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 13 (6): 377 ~ 386
- [6] ATC 32. 1996. Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations. Redwood City, CA: Applied Technology Council (ATC)
- [7] HAZUS99 User's Manual. 1999. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency
- [8] SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures: Analysis Reference. 1996. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc.

(上接第 40 页)

刘 钊 博士, 副教授, 东南大学土木工程学院。长期从事桥梁工程研究。

孟少平 博士, 教授, 博士生导师, 东南大学 RC&PC 结构教育部重点实验室常务副主任。长期从事预应力及桥梁工程研究。通讯地址: 210096 南京东南大学土木工程学院

刘 智 东南大学土木工程学院硕士生。

吉 林 博士, 研究员级高工, 江苏省长江公路大桥建设指挥部总工程师, 曾参与江阴长江公路大桥等大型桥梁建设。

欧庆保 高级工程师, 江苏省长江公路大桥建设指挥部工程处处长, 曾参与多座大型桥梁建设。

王 强 工程师, 江苏省长江公路大桥建设指挥部工程处工程二科科长, 曾参与多座大型桥梁建设。